

# T5 - MACHINES THERMIQUES

## Programme ATS

Diagramme fonctionnel des machines cycliques dithermes	Prévoir les signes des transferts d'énergie. Définir le rendement d'un moteur. Définir le coefficient de performance (CoP) d'une machine frigorifique et celui d'une pompe à chaleur (PAC).
--	---

<b>10. Machines dithermes</b>	
Le premier principe en système ouvert	Définir un système ouvert en écoulement stationnaire. Utiliser des grandeurs massiques ; définir le travail indiqué massique sur les parties mobiles. Décrire les différents organes des machines (détendeur, compresseur, turbine, condenseur, évaporateur, chambre de combustion, etc.). Appliquer le premier principe en système ouvert.
Système diphasé liquide-vapeur	Exploiter les diagrammes (T,s), (h,s) et (p,h).
Théorèmes des moments	Calculer ou exploiter un titre massique en vapeur.
Exploitations de diagrammes ou de tableaux de données	Calculer les transferts thermiques massiques, les travaux indiqués massiques et le coefficient de performance (CoP).
Puissances	Utiliser le débit massique pour évaluer des puissances.
<b>11. Utilisation d'un modèle</b>	
Technologie des moteurs à pistons	Distinguer les temps mécaniques (4 temps ou 2 temps) et identifier les temps thermodynamiques (modélisation par des transformations thermodynamiques).
Modèle du gaz parfait	Calculer un paramètre avec l'équation d'état du gaz parfait. Utiliser, dans l'approximation où les capacités thermiques à pression constante et à volume constant sont constantes, la relation de Mayer et le coefficient isentropique. Citer quelques limites du modèle.
Loi de Laplace	Utiliser les lois de Laplace pour évaluer des pressions ou des températures dans le cas de compressions ou détentes de gaz parfait dans l'hypothèse adiabatique et mécaniquement réversible.
Diagramme de Clapeyron	Tracer un cycle dans l'approximation d'une transformation mécaniquement réversible.
Aspects énergétiques	Calculer les transferts thermiques, les travaux et en déduire le coefficient de performance (CoP) ou le rendement.
Puissance, consommation	Lier la puissance au nombre de tours par minute.

### Machine thermique selon les Shadoks :

<https://www.youtube.com/watch?v=xiCajZYCB1I>

## I) PRINCIPE ET TECHNOLOGIE DES MACHINES THERMIQUES

■ **Machine thermique** : dispositif fonctionnant en **cycles** dans lequel un fluide échange de l'énergie par transfert thermique et par travail, avec **conversion entre puissance mécanique et puissance thermique** (entre **travail et chaleur**).

Deux caractéristiques principales :

- × Dans une machine thermique, les **transferts thermiques** jouent un rôle central (contrairement à un moteur électrique par exemple)
- × D'un point de vue thermodynamique, le système étudié est l'agent thermique, dont le **fonctionnement cyclique** est primordial : l'état final du fluide est identique à son état initial, et les **variations de toutes les fonctions d'état (en particulier  $U$ ,  $H$  et  $S$ ) sur un cycle complet sont nulles.**

### Deux types de fonctions

- **Moteur thermique** : machine qui fournit effectivement du travail à l'extérieur.

**Exemples** : Moteurs d'avion ou de voiture, turbines à vapeur dans les centrales électriques permettant de mettre en rotation l'alternateur.

- **Récepteur thermique**, aussi appelé **machine frigorifique** au sens large : machine qui réalise un transfert thermique effectif de sens contraire au sens naturel.

**Exemples** : Un frigo ou un climatiseur permet de refroidir la partie la plus froide de l'installation, alors qu'une pompe à chaleur permet de réchauffer la partie la plus chaude.

### Deux types de structure

#### **Machine à piston**

Ensemble bielle – piston – vilebrequin  
assurant la rotation du moteur

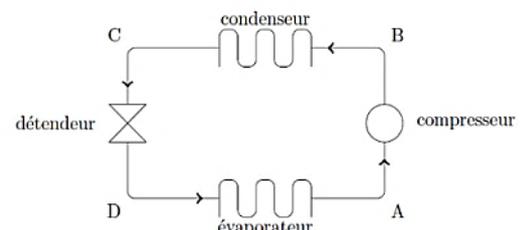


L'ensemble des transformations de l'agent thermique ont lieu dans un **même cylindre** (chambre cylindrique), dont le volume varie grâce à un **piston mobile**. Plusieurs chambres (pistons) peuvent être montées en parallèle.

**Exemple** : moteur à combustion.

#### **Machine à écoulement**

- **Machine à écoulement de fluide** : un **fluide** (dit caloporteur ou frigorigène selon les situations) **circule** dans la machine et **traverse successivement** différents organes élémentaires (*détendeur, compresseur, échangeur thermique, etc.*). A chaque organe correspond l'une des transformations caractéristiques du cycle réalisé dans la machine.
- **Une machine à écoulement peut** être un moteur ou un récepteur ; des changements d'état du fluide sont souvent mis en jeu.



Principe d'une machine frigorifique : écoulement d'un fluide dans une succession d'organes

**Exemples** : congélateur, circuit hydraulique d'une centrale électrique thermique.

### Deux points de vue complémentaires

- **Approche de type « système fermé » : Voir I à IV de ce cours**

On applique les principes de la thermodynamique au système constitué de la totalité du fluide contenu dans le circuit, correspondant à un **système fermé** (ou qu'on modélise comme un système fermé, cf. ci-dessous la modélisation du moteur à explosion) au cours d'une **transformation correspondant à exactement un cycle complet**.

- **Approche de type « système ouvert » : Voir V de ce cours**

On applique les principes de la thermodynamique à **chaque organe élémentaire individuellement**, avec la différence essentielle qu'il s'agit alors d'un **système ouvert**, du fluide entrant et sortant de cet organe à tout instant.

Il faut alors adapter l'expression du bilan d'énergie issu du premier principe.

## II) LES MOTEURS

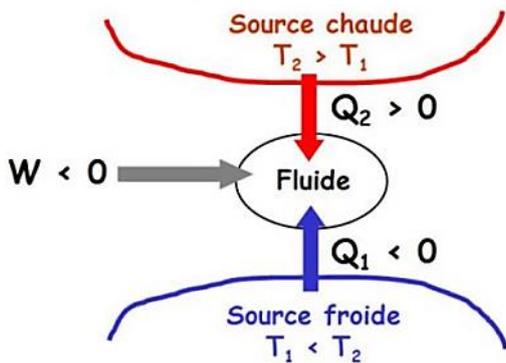
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/moteurD.html>

### Exemple de cycle ditherme : Cycle de Carnot (moteur)

Simulation : <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/carnot.html>

<http://olivier.granier.free.fr/Seq08/co/rappels-de-cours-thermo-machines-thermiques.html>

Le schéma de principe est le suivant :

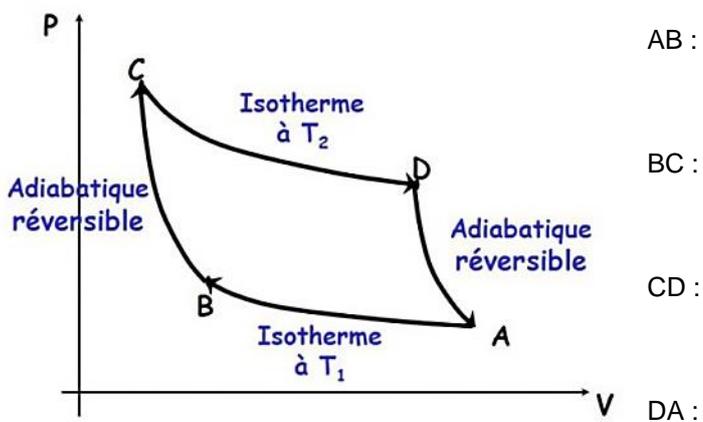


Le fluide (air + combustible) reçoit de la chaleur de la source chaude :

Le fluide fournit un travail mécanique à l'extérieur :

Le fluide rejette une partie de l'énergie calorifique à la source froide :

Rendement du moteur :



### Moteur de Carnot réversible

1<sup>er</sup> principe appliqué au fluide :

2<sup>ème</sup> principe appliqué au fluide :

Détermination du rendement du moteur :

Ordre de grandeur du rendement de Carnot :

Moteur de Carnot irréversible

1<sup>er</sup> principe appliqué au fluide :

2<sup>ème</sup> principe appliqué au fluide :

Détermination du rendement du moteur :

Ordre de grandeur du rendement de Carnot :

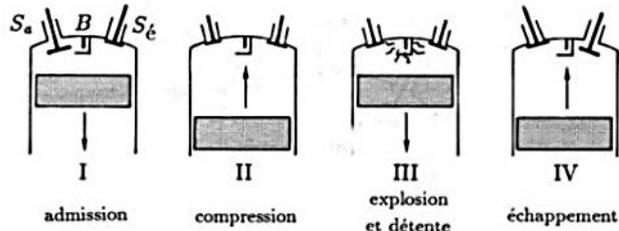
**Cycle de Beau de Rochas : moteur explosion à 4 temps (essence)**

<http://olivier.granier.free.fr/Seq08/co/rappels-de-cours-thermo-machines-thermiques.html>

Simulation : <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/rochas.html>

**Cycle théorique de Beau de Rochas (1862), réalisé par Otto (1876) - le moteur à explosion à 4 temps**  **Exemple**

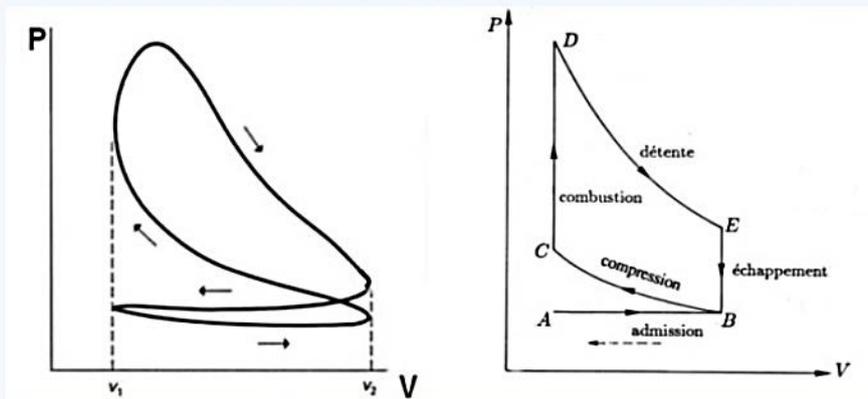
La figure suivante donne les 4 temps d'un moteur à explosion.



$\left\{ \begin{array}{l} S_a = \text{soupape d'admission} \\ S_e = \text{soupape d'échappement} \end{array} \right.$        $B$  bougie

*Moteur à explosion à 4 temps*

Les diagrammes expérimental (à gauche) et théorique (à droite) sont proposés sur la figure suivante.



*Diagrammes dans le plan de Clapeyron (P,V)*

Hypothèses :

BC :

CD :

DE :

EB :

1<sup>er</sup> principe appliqué au au fluide (air + combustible) :

Transformations isochores :

Rendement :

Isochores :

Transformations adiabatiques réversibles :

BC :

DE :

Rendement :

### **Moteurs 2 temps / moteurs 4 temps**

[Animation d'un moteur 2 temps](#)

[Animation moteur à 4 temps](#)

### III) LES RECEPTEURS : MACHINES FRIGORIFIQUES

<http://olivier.granier.free.fr/Seq08/co/rappels-de-cours-thermo-machines-thermiques.html>

Simulations :

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Thermo/Machines/Frigo\\_F.php?typanim=Flash](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Thermo/Machines/Frigo_F.php?typanim=Flash)

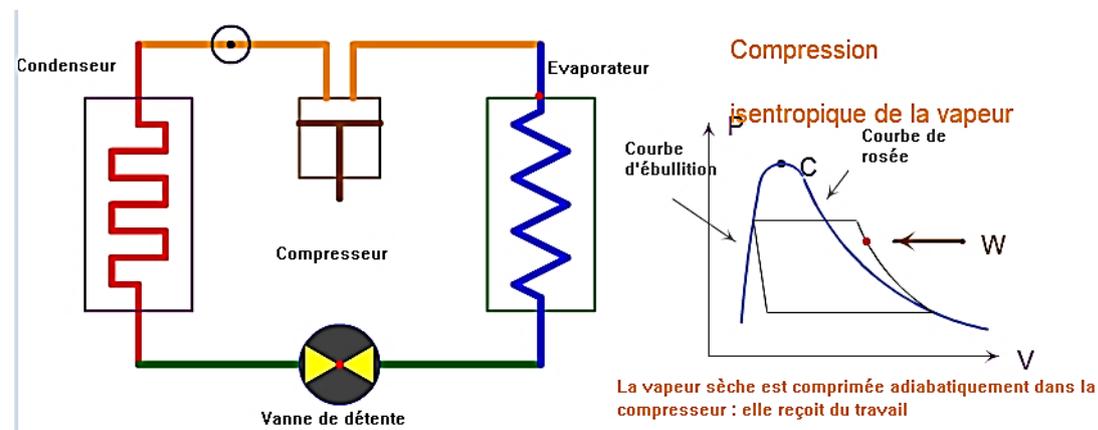
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/frigo.html>

Le fonctionnement d'une **machine frigorifique** est basé sur le cycle thermodynamique d'un fluide, appelé **fluide frigorigène, qui change d'état au cours du cycle.**

Exemples de fluides frigorigènes :

- ✓ Fluides abandonnés : Ammoniaque  $\text{NH}_3$  (toxique), R11, R12 (contiennent des chlorofluorocarbones CFC, qui détruisent la couche d'ozone), ...
- ✓ Fluides utilisés aujourd'hui : R125, R410A, ...

Le système étudié est le fluide frigorigène, que l'on pourra retrouver dans 3 états différents au cours du cycle :

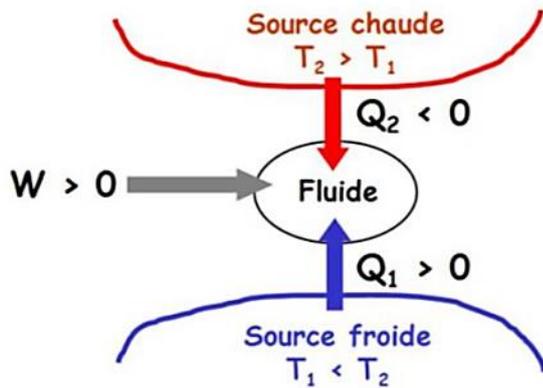


- Etape 1 - 2 : Compresseur
- Etape 2 - 3 : Condenseur (échangeur de chaleur avec la source chaude)
- Etape 3 - 4 : Détendeur

- Etape 4 – 1 : Evaporateur (échangeur de chaleur avec la source froide)

Etude en système fermé : Première approche

Etude en système ouvert : Deuxième approche

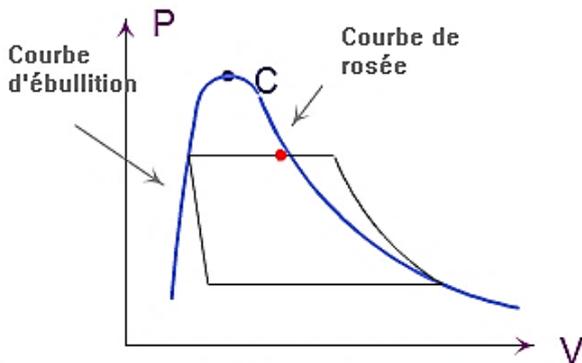


**Exemple de cycle ditherme : cycle de Carnot (récepteur)**

Le fluide frigorigène (gaz) reçoit du travail de la part du compresseur :

Le fluide frigorigène fournit de l'énergie calorifique à la source chaude et se condense :

Le fluide reçoit de l'énergie calorifique de la source froide et se vaporise :



Si on s'intéresse au refroidissement de la source froide :

Efficacité du **réfrigérateur** (ou **climatiseur**) :

1<sup>er</sup> principe appliqué au fluide :

2<sup>ème</sup> principe appliqué au fluide :

Détermination de l'efficacité du réfrigérateur :

Ordre de grandeur :

Si on s'intéresse au chauffage de la source chaude :

Efficacité de la **pompe à chaleur** :

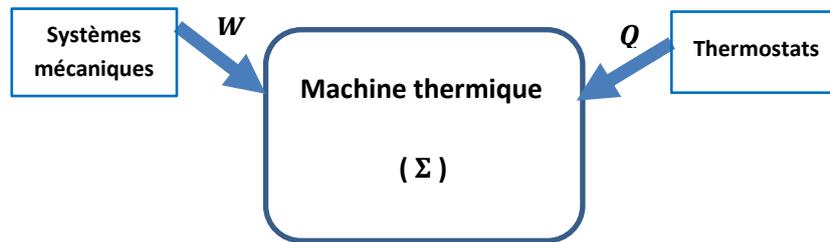
1<sup>er</sup> principe appliqué au fluide :

2<sup>ème</sup> principe appliqué au fluide :

Détermination de l'efficacité de la PAC :

Ordre de grandeur :

## IV) BILAN SUR LES MACHINES THERMIQUES DITHERMES



Une **machine thermique ditherme** fonctionne au contact de **2 thermostats** aux températures  $T_c$  et  $T_f$ , avec  $T_c > T_f$ .

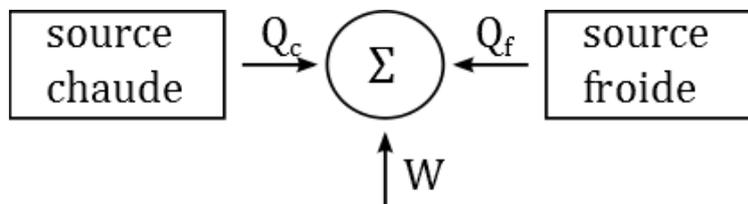
Source de chaleur à la température la plus faible  $T_f$  : **source froide**, l'autre **source chaude**.

### IV)1) Représentation schématique d'une machine cyclique ditherme

On s'intéresse aux transferts d'énergie **reçus par le fluide ( $\Sigma$ ) qui décrit des cycles**.

Ces transferts sont comptés positivement s'ils sont réellement reçus par le fluide, négativement dans le cas contraire.

On note  $Q_c$  et  $Q_f$  les transferts thermiques échangés avec les sources chaude et froide au cours d'un cycle et  $W$  le travail échangé sur l'ensemble du cycle.



$W$ ,  $Q_c$  et  $Q_f$  sont ALGÈBRIQUES.

### IV)2) Moteurs et récepteurs

On distingue deux types de machines thermiques : les machines thermiques **motrices ou moteurs thermiques**, et les machines thermiques **réceptrices (ou récepteurs)**.

- **Moteur thermique** : le système (fluide caloporteur) **cède / fournit de l'énergie mécanique au milieu extérieur** ; le **travail reçu par le fluide** caloporteur au cours du cycle est donc  $W_{\text{cycle}} < 0$

**Exemples** : moteurs essence, diesel, turboréacteurs pour la propulsion des avions, etc.).

- **Récepteur thermique** : le système (fluide caloporteur) **reçoit de l'énergie mécanique du milieu extérieur** pour pouvoir fonctionner ; le **travail reçu par le fluide** caloporteur au cours du cycle est donc  $W_{\text{cycle}} > 0$ .

**Exemples** : machine frigorifique au sens large du terme (climatiseurs, réfrigérateurs, pompes à chaleurs...).

■ Pour un cycle décrit par le fluide représenté dans un diagramme de **Clapeyron**, le **cycle** pour un **moteur** sera parcouru dans le sens **horaire** et le **cycle** pour un **récepteur** sera parcouru dans le sens **trigonométrique**.

Parmi les machines dithermes réceptrices, certaines n'ont que peu d'intérêt ; l'utilisateur fournissant du travail, les **récepteurs** sont dits « **utiles** » lorsqu'ils permettent des échanges thermiques qui ne se feraient pas spontanément (frigos, pompes à chaleur ou climatiseur par exemple).

### IV)3) Efficacité d'une machine thermique

#### Définition

On caractérise l'efficacité d'une machine thermique en comparant sur un cycle :

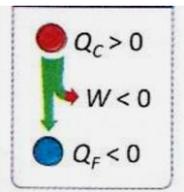
- La quantité d'énergie recherchée pour l'utilisateur (= le « **BUT** » du fonctionnement de la machine)
- La quantité d'énergie ayant un coût économique pour l'utilisateur (= le « **COÛT** » du fonctionnement de la machine)

**Efficacité d'une machine thermique :**

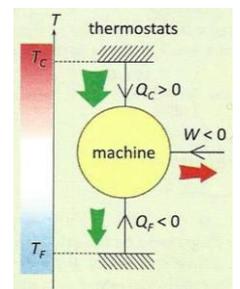
$$efficacit  =$$

### Les principaux types de machines thermiques et leur principe de fonctionnement

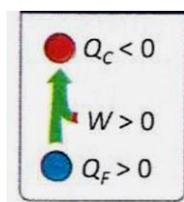
#### a) Principe de fonctionnement d'un moteur ditherme



Pour qu'un système réalise un **cycle moteur**, il doit échanger de l'énergie thermique avec **au moins 2 sources**   des températures différentes, en recevant de l'énergie thermique de la source chaude :  $q_c > 0$ , et en fournissant à l'extérieur un travail mécanique :  $w < 0$ , tout en cédant de l'énergie thermique à la source froide :  $q_f < 0$ .

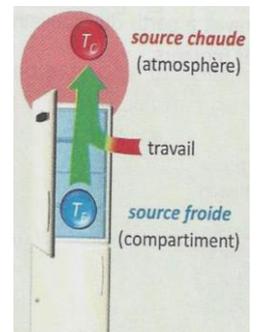


#### b) Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur

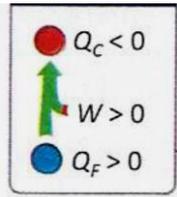


Une machine frigorifique sert à refroidir, l'extérieur correspondant à la source chaude, l'intérieur de la machine frigorifique, qui doit être refroidi, à la source froide.

Il faut donc que le fluide cède de l'énergie à la source chaude, soit  $q_c < 0$ , après l'avoir reçue de la source froide, soit  $q_f > 0$ , et ce grâce à un travail reçu, soit  $w > 0$  (machine réceptrice).

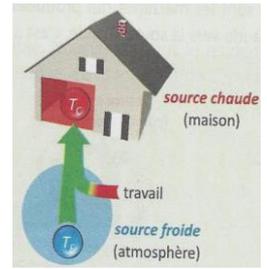


c) **Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC)**



Une PAC sert de « chauffage », la pièce à chauffer correspondant à la source chaude, l'extérieur (au sens large du terme) à la source froide.

Il faut donc que le fluide cède de l'énergie à la source chaude, soit  $q_c < 0$ , après l'avoir reçue de la source froide, soit  $q_f > 0$ , et ce grâce à un travail reçu, soit  $w > 0$  (machine réceptrice).



**Rendements et coefficients de performance (COP)**

**Efficacité d'une machine thermique**

$$efficacit  = \frac{\text{"grandeur utile"}}{\text{"grandeur de c ot"}} = \frac{\text{énergie recherch e sur un cycle}}{\text{énergie ayant un c ot sur un cycle}}$$

Machine thermique	Moteur ditherme	Machine frigorifique	Pompe � chaleur
Signes des échanges			
Efficacités	$e_m = \frac{-W}{Q_c}$	$CoP_{frigo} = \frac{Q_f}{W}$	$CoP_{PAC} = \frac{-Q_c}{W}$

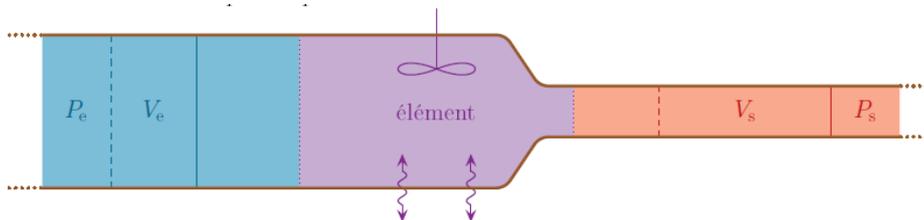
**V) MACHINES AVEC ECOULEMENT : SYSTEMES OUVERTS**

**A) Premier principe appliqué à un système en écoulement permanent**

**1) Présentation**

Dans les exemples étudiés précédemment, le fluide subit des transformations en vase clos dans un cylindre, mais dans de nombreuses autres situations, le fluide est en ** coulement**   travers un certain nombre **d'organes (ou éléments)** qui constituent la machine thermique ; chaque organe définit un volume de contrôle à travers lequel le fluide s'écoule en subissant des transformations.

Tout organe ( l ment) peut être schématisé ainsi, et constituant un **système ouvert** :



**Système fermé** : Système pour lequel il n'y a ni entrée ni sortie de matière.

**Système ouvert** : Le système va être caractérisé par une surface fictive, appelée « surface de contrôle », qui reste fixe au cours du temps. La masse située dans le « volume de contrôle » varie (ou peut varier) au cours du temps.

**Système en écoulement permanent :** Système ouvert dont les paramètres caractéristiques sont **stationnaires**, c'est-à-dire constants au cours du temps.

La plupart des machines industrielles traversées par un fluide (compresseur, détendeur, échangeur thermique, chambre de combustion...) sont des systèmes en écoulement permanent.

**On cherche une formulation du premier principe plus adaptée à ces fluides en écoulement permanent.**

## 2) Définition du système

Le système considéré est défini par la **surface de contrôle** ( $\Sigma$ ) ou ( $\Sigma_0$ ) (dans le cas de l'étude d'un organe, elle englobe l'organe étudié), et constitue un **système ouvert**, avec une masse  $dm_e$  de fluide entrant dans ( $\Sigma$ ) entre les instants  $t$  et  $t + dt$  et une masse  $dm_s$  de fluide qui en sort entre les instants  $t$  et  $t + dt$ .

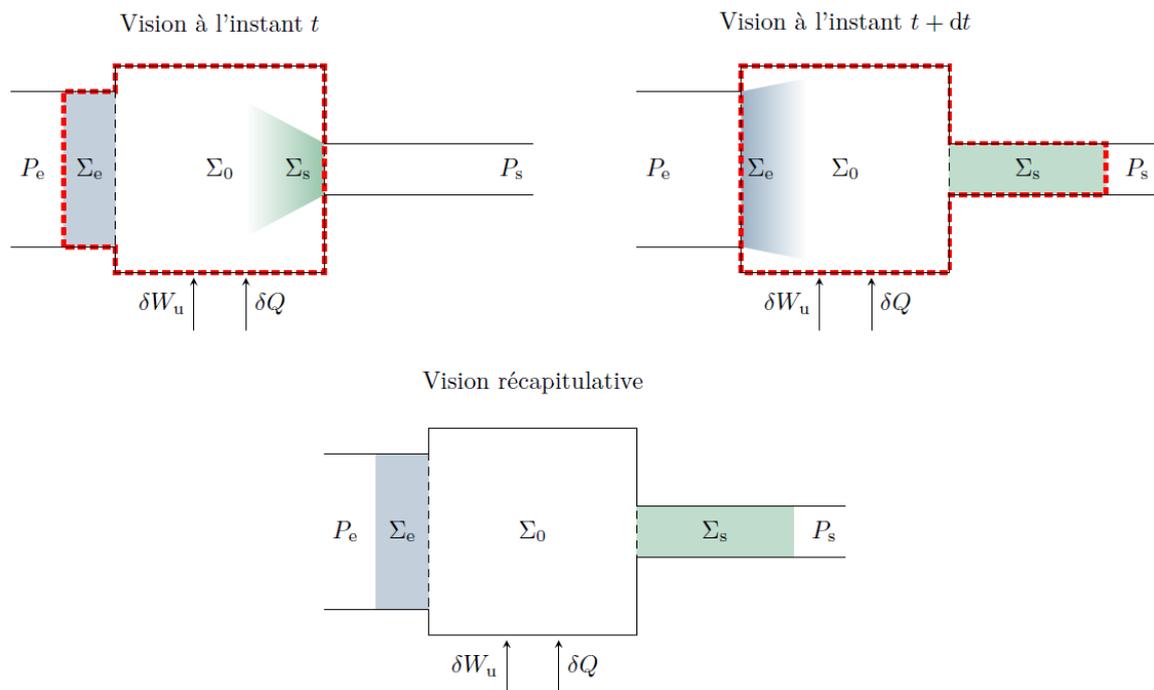
La masse  $dm_e$  entrant pendant  $dt$  constitue le système ( $\Sigma_e$ ), tandis que la masse  $dm_s$  sortant pendant  $dt$  constitue le système ( $\Sigma_s$ ).

On définit alors le système ( $\Sigma^*$ ) associé à ( $\Sigma$ ) de la manière suivante :

A l'instant  $t$ ,  $(\Sigma^*)(t) = (\Sigma)(t) + (\Sigma_e)$  (volume de contrôle plus matière qui va entrer dans ce volume pendant la durée  $dt$ )

A l'instant  $t + dt$ ,  $(\Sigma^*)(t + dt) = (\Sigma)(t + dt) + (\Sigma_s)$  (volume de contrôle plus matière qui va sortir de ce volume pendant la durée  $dt$ ).

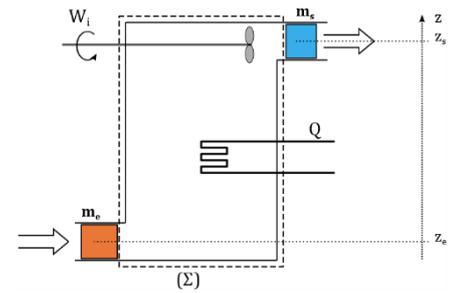
Ainsi défini, ce système ( $\Sigma^*$ ) constitue un système fermé (ses frontières se déplacent avec le fluide en écoulement).



Se ramener d'un système ouvert à un système fermé.

Pendant ce temps  $dt$ , le système  $(\Sigma)$  reçoit :

- un **transfert thermique**  $\delta Q$  (algébrique)
- un **travail indiqué**  $\delta W_i$  (algébrique), ou travail machine, ou **travail utile**  $\delta W_u$  (travail directement échangé entre la machine et le fluide en écoulement, dû aux pièces mobiles de la machine, **sans prendre en compte le travail des forces pressantes** à l'entrée et à la sortie de la machine).



Pendant ce temps  $dt$ ,

La masse  $dm_e$  entrant dans le système a les caractéristiques suivantes :

$p_e$	pression
$T_e$	température
$v_e$	volume massique
$u_e$	énergie interne massique
$h_e$	enthalpie massique
$c_e$	vitesse
$z_e$	altitude

La masse  $dm_s$  sortant du système a les caractéristiques suivantes :

$p_s$	pression
$T_s$	température
$v_s$	volume massique
$u_s$	énergie interne massique
$h_s$	enthalpie massique
$c_s$	vitesse
$z_s$	altitude

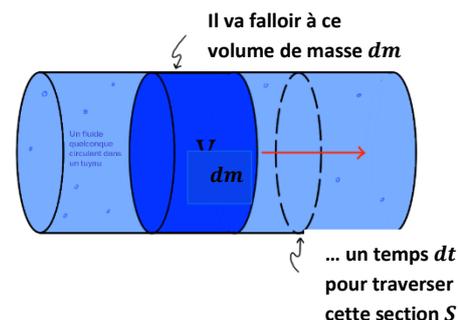
On se place dans le cadre d'un fluide en **écoulement permanent**

■ **Régime permanent** : Les caractéristiques du fluide contenu dans  $(\Sigma)$  sont constantes au cours du temps : masse, énergie totale, pressions, températures, etc. Les paramètres intensifs à l'entrée et à la sortie sont également indépendants du temps.

■ **Débit massique** : Si une masse  $dm$  traverse une section de conduite pendant un temps  $dt$ , alors le débit massique au niveau de cette conduite est défini par :

$$D_m =$$

Unité :



### 3) Conservation de la masse

En régime permanent, il n'y a pas d'accumulation de matière dans  $(\Sigma)$ , dont la masse  $M$  est constante :

$$M(t) = M(t + dt) \quad (1).$$

De plus, le système  $(\Sigma^*)$  étant fermé, par conservation de la matière, sa masse  $M^*$  est constante, soit

$$M^*(t) = M^*(t + dt) \quad (2)$$

Or  $M^*(t) = M(t) + dm_e$  et  $M^*(t + dt) = M(t + dt) + dm_s$

Dans (2) :  $M^*(t) = M(t) + dm_e = M^*(t + dt) = M(t + dt) + dm_s$ ,

Avec (1) :  $dm_e = dm_s = dm$

La masse  $dm_e$  entrant pendant  $dt$  dans la machine est égale à la masse  $dm_s$  sortant de la machine pendant  $dt$  :

$$dm_e = dm_s = dm$$

Le débit massique  $D_m$ , ici défini par :  $D_m = \frac{dm}{dt}$ , est constant.

#### 4) Exploitation du premier principe

##### ■ BILAN ISSU DU PREMIER PRINCIPE

Soient	$E^*$	l'énergie totale de ( $\Sigma^*$ )	$E$	l'énergie totale de ( $\Sigma$ )
	$U^*$	l'énergie interne de ( $\Sigma^*$ )	$U$	l'énergie interne de ( $\Sigma$ )
	$E_m^*$	l'énergie mécanique de ( $\Sigma^*$ )	$E_m$	l'énergie mécanique de ( $\Sigma$ )
	$E_c^*$	l'énergie cinétique de ( $\Sigma^*$ )	$E_c$	l'énergie cinétique de ( $\Sigma$ )
	$E_p^*$	l'énergie potentielle de ( $\Sigma^*$ )	$E_p$	l'énergie potentielle de ( $\Sigma$ )

On peut appliquer le premier principe à ( $\Sigma^*$ ), qui constitue un système fermé, sur l'intervalle de temps  $dt$  :

$$dE^* = E^*(t + dt) - E^*(t) = \delta Q + \delta W$$

Avec  $\delta Q$  quantité de chaleur algébriquement reçue par ( $\Sigma^*$ ) entre  $t$  et  $t + dt$

$\delta W$  travail algébriquement reçu par ( $\Sigma^*$ ) entre  $t$  et  $t + dt$

$$E^* = U^* + E_m^* = U^* + E_c^* + E_p^*$$

##### ■ VARIATIONS D'ENERGIE

En régime stationnaire, les différentes grandeurs  $X$  associées à ( $\Sigma$ ) sont indépendantes du temps :

$X(t) = X(t + dt)$ .

$$U^*(t + dt) - U^*(t) = [U(t + dt) + dm_s u_s] - [U(t) + dm_e u_e]$$

$$U^*(t + dt) - U^*(t) = dm_s u_s - dm_e u_e \quad \text{car } U \text{ est constante au cours du temps}$$

(stationnaire)

$$= dm (u_s - u_e)$$

Il en va de même pour  $E_c^*$  et  $E_p^*$

$$dE^* = dm (u_s - u_e) + dm (e_{cs} - e_{ce}) + dm (e_{ps} - e_{pe}) = dm (u_s - u_e) + dm (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + dm g (z_s - z_e) \quad (1)$$

■ **TRAVAIL DES FORCES DE PRESSION**

$$\delta W = \delta W_{pression} + \delta W_i$$

$$\delta W_{pression} = (\delta W_{pression})_{entrée} + (\delta W_{pression})_{sortie}$$

$$(\delta W_{pression})_{entrée} = -p_e dV_e$$

avec  $dV_e$  volume balayé par  $dm_e$ , correspondant en valeur absolue au volume occupé par  $dm_e$  à l'instant  $t$ , soit  $v_e dm$ .

De plus, ce volume occupé par la masse entrant diminue, soit  $dV_e(t) = -v_e dm$ . Finalement :

$$(\delta W_{pression})_{entrée} = +p_e v_e dm$$

On peut vérifier le signe de ce travail : il faut réellement fournir un travail au fluide afin de le faire entrer dans le système ; en pratique il est poussé par le fluide arrivant en amont. Ceci est cohérent avec l'expression établie correspondant bien à un travail positif :  $(\delta W_{pression})_{entrée} = +p_e v_e dm > 0$

$$(\delta W_{pression})_{sortie} = -p_s (V_s(t + dt) - V_s(t)) = -p_s (dV_s(t)) = -p_s v_s dm$$

$$dE^* = \delta Q + \delta W = \delta Q + \delta W_i + dm (p_e v_e - p_s v_s) \quad (2)$$

En identifiant (1) et (2) on obtient :

$$dm (u_s - u_e) + dm (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + dm g (z_s - z_e) = \delta Q + \delta W_i + dm (p_e v_e - p_s v_s)$$

$$dm (u_s + p_s v_s - u_e - p_e v_e) + dm (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + dm g (z_s - z_e) = \delta Q + \delta W_i$$

On voit apparaître **l'enthalpie** comme fonction d'état importante pour cette étude de système en écoulement permanent :

$$dm [(h_s - h_e) + (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + (gz_s - gz_e)] = \delta Q + \delta W_i$$

Si on divise cette équation par  $dt$ , on obtient une **équation en termes de puissances** :

- **Puissance indiquée (utile) reçue  $P_i$  :  $P_i =$**
- **Puissance thermique reçue  $P_{th}$  :  $P_{th} =$**
- **Premier principe appliqué à un écoulement permanent, équation en termes de puissance :**

Où  $D_m = \frac{dm}{dt}$  débit massique (en  $kg \cdot s^{-1}$ ),

On peut aussi écrire **l'équation relative à une unité de masse** en divisant la première équation par  $dm$ .

On note alors  $w_i = \frac{\delta W_i}{dm}$  **le travail indiqué massique** (ou travail massique net) et  $q = \frac{\delta Q}{dm}$  **le transfert thermique massique**. Ce sont donc le travail indiqué et la chaleur reçus par la machine pour une unité de masse de fluide traversant la machine.

- **Premier principe appliqué à un écoulement permanent, équation massique :**

Résultats à connaître. Attention à l'homogénéité des relations écrites !

## **B) Application à l'étude des machines thermiques en écoulement permanent**

### **Expressions du premier principe industriel**

Chaque organe étudié constitue un **système ouvert**, pour lequel il faudra utiliser le premier principe industriel.

- **Premier principe industriel simplifié** appliqué à un élément quelconque d'une machine thermique à écoulement fonctionnant en régime stationnaire :

Cas usuel : en négligeant les variations d'énergie mécanique macroscopique du fluide,

$$h_s - h_e = w_i + q$$

$\Delta h = h_s - h_e =$  **variation d'enthalpie massique entre l'entrée et la sortie de l'élément, au même instant  $t$  considéré**

$w_i$  travail massique indiqué reçu par le fluide dans l'élément (forces autres que les forces de pression)

$q$  transfert thermique massique reçu par le fluide dans l'élément

- **Bilan en terme de puissance :**  $D_m.(h_s - h_e) = \dot{Q} + \dot{W}_u = \mathcal{P}_{th} + \mathcal{P}_u$

$D_m = \frac{dm}{dt}$  débit massique (en  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ),

Les équations obtenues ne concernent **plus les variations des fonctions d'état au cours d'une transformation de durée finie**, mais les **différences entre les fonctions d'état massiques en entrée et en sortie de chaque organe en régime permanent**.

Les deux approches « système ouvert » et « système fermé » sont complémentaires l'une de l'autre, mais ne doivent être ni confondues, ni mélangées.

## C) Etude des principaux organes des machines

### 1. Détendeur, vanne de détente

Dans un détendeur, l'écoulement rencontre un obstacle (soupape, bouchon poreux, robinet).

**Le détendeur est destiné à abaisser la pression du fluide :  $p_s < p_e$ .**

La détente se fait le plus souvent dans une conduite horizontale, sans variation conséquente d'énergie cinétique. Le fluide ne reçoit ni transfère thermique ni travail utile.

On parle de **détente de Joule-Thomson**.

$$\text{Avec } (h_s - h_e) + \left(\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2\right) + (gz_s - gz_e) = w_i + q ,$$

le premier principe industriel s'écrit donc :



### 2. Compresseur, pompe

**Compresseur : destiné à augmenter la pression d'un gaz :  $p_s > p_e$ . (Pompe pour un liquide).**

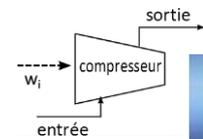
On apporte un travail mécanique pour mettre en mouvement les pièces mobiles et augmenter l'enthalpie du fluide.

Sauf indication contraire, on suppose que l'évolution du fluide est adiabatique ( $q = 0$ ).

On néglige d'autre part les variations d'énergie cinétique et potentielle.

$$\text{Avec } (h_s - h_e) + \left(\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2\right) + (gz_s - gz_e) = w_i + q ,$$

le premier principe industriel s'écrit donc :



### 3. Turbine

**Le but de la turbine est de fournir un travail utile ; elle fonctionne à l'envers du compresseur.**

Le fluide passe à travers des pales attachées à un arbre rotatif pour fournir du travail.

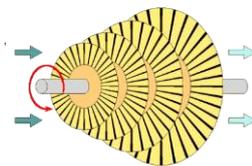
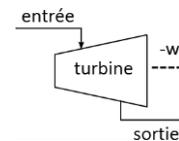
Dans les turbines à vapeur ou à gaz, la vapeur ou le gaz surchauffé entre dans la turbine et se détend à une pression plus basse à la sortie, en faisant tourner les pales.

$$p_s < p_e$$

Sauf indication contraire, on suppose que l'évolution du fluide est adiabatique ( $q = 0$ ) ; on néglige d'autre part les variations d'énergie cinétique et potentielle.

L'utilisateur veut **recupérer un travail utile**  $w_{\text{recupéré}} =$

$$\text{Avec } (h_s - h_e) + \left(\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2\right) + (gz_s - gz_e) = w_i + q$$



le 1<sup>er</sup> principe industriel s'écrit donc :  $w_{\text{recupéré}} =$

Remarque : Dans les turbines hydrauliques, l'eau en tombant à travers les pales les fait tourner.

#### 4. Échangeur thermique, condenseur, évaporateur, chambre de combustion

Ces organes ne comportent **pas de parties mobiles**, donc  $w_i = 0$  ; on néglige de plus les variations d'énergie cinétique et potentielle.

$$\text{Avec } (h_s - h_e) + (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + (gz_s - gz_e) = w_i + q$$

le premier principe industriel s'écrit donc :  $q =$

- **Échangeur thermique** : dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger, à travers une surface d'échange qui sépare les fluides.



La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou difficile de refroidir ou chauffer directement, par exemple l'eau d'un circuit primaire de refroidissement de centrale nucléaire.

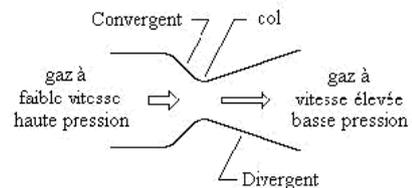
- **Condenseur** : permet à la vapeur de se liquéfier (c'est-à-dire de se condenser), partiellement ou totalement. Le fluide cède de la chaleur dans le condenseur :  $q$
- **Évaporateur** : permet au liquide de se vaporiser, partiellement ou totalement. Le fluide absorbe de la chaleur dans l'évaporateur :  $q$
- **Chambre de combustion** : enceinte dans laquelle on déclenche volontairement une combustion, afin de fournir des gaz chauds à la turbine et de participer à la propulsion à travers leur détente dans la tuyère d'éjection.

#### 5) Tuyère

**But** de la tuyère : **accroître l'énergie cinétique du fluide.**

**Principe** : conduit de section droite variable placé à l'arrière d'un moteur produisant des gaz de combustion chauds qui permet de transformer l'énergie thermique de ceux-ci en énergie cinétique.

**Modélisation** : tuyère supposée parfaitement calorifugée, aucun échange de travail utile avec l'extérieur, fluide entrant dans la tuyère avec une vitesse en général négligeable devant la vitesse de sortie  $c_s$ .



$$\text{Avec } (h_s - h_e) + (\frac{1}{2} c_s^2 - \frac{1}{2} c_e^2) + (gz_s - gz_e) = w_i + q$$

Le premier principe industriel s'écrit donc :

#### 6) Résumé des caractéristiques des principaux organes

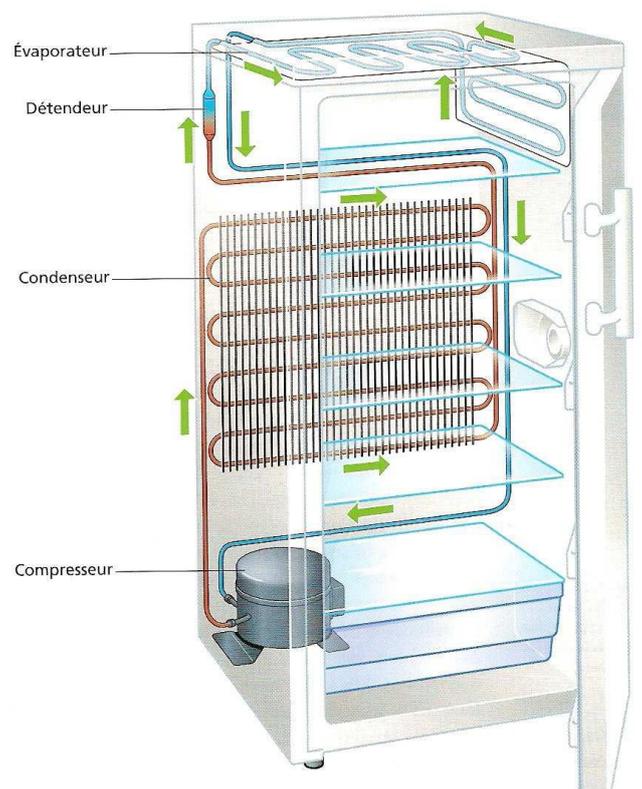
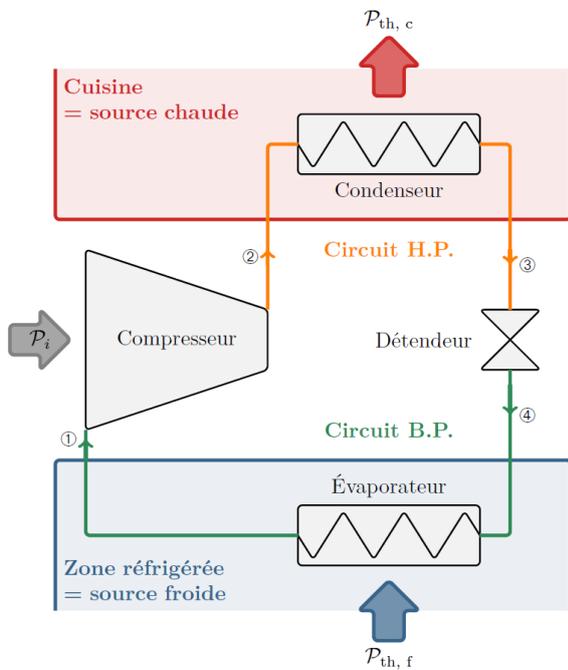
Chaque organe a un rôle spécifique, consistant à réaliser un transfert thermique ou à échanger un travail utile.

Organe	rôle	Nature de la transformation	Echanges d'énergie
Compresseur	augmenter la pression d'un gaz	Adiabatique, modèle classique : isentropique	
Pompe	augmenter la pression d'un liquide	Adiabatique	
Vanne de détente (détendeur)	diminuer la pression d'un fluide	Isenthalpique	
Turbine	mise en mouvement par le fluide	Adiabatique	
Echangeur thermique ; chaudière, etc.	Faire varier la température du fluide ou faire un changement d'état		
Évaporateur	Echangeur thermique particulier dans lequel il y a vaporisation	Monobare	
Condenseur	Echangeur thermique particulier dans lequel il y a liquéfaction	Monobare	

Il faut connaître la fonction de chacun de ces éléments et savoir retrouver l'écriture pertinente du premier principe industriel pour chacune d'elles.

## D) Exemples

### 1) Réfrigérateur à fréon



## 2) Exemple d'un moteur : cycle de Rankine

Le cycle de Rankine réel est celui de la plupart des machines thermiques dites à combustion externe actuellement utilisées : machines à vapeur pour la propulsion de bateaux, de sous-marins, ou pour la production d'électricité dans le sens moteur (centrales thermiques ou nucléaires).

